

РАССЕИВАНИЕ ЭНЕРГИИ В КОНТАКТЕ, ИМЕЮЩЕМ НАПРАВЛЕННОСТЬ СЛЕДОВ ОБРАБОТКИ

В. И. МАКСАК

(Представлена научным семинаром кафедры сопротивления материалов)

В последнее время появляется все больше работ, посвященных вопросам рассеивания энергии в контакте [1—7]. Это связано со значительными возможностями конструкционного демпфирования. В ряде случаев рассеивание энергии в сочленениях достигает 90% [7]. До сих пор при изучении рассеивания энергии принималось, что механические свойства поверхности образцов в плоскости контакта изотропны. Однако направленность следов механической обработки поверхности часто имеет место и в процессах контактирования проявляется не только механической анизотропией, но и особенностью деформации шероховатостей, имеющих вытянутую форму.

В работе рассматривается рассеивание в контакте энергии в условиях упругого предварительного смещения. Эксперимент проводился в статических и динамических условиях на стальных, медных и свинцовых образцах, имеющих различную шероховатость контактирующих поверхностей. Установка и образцы для исследования контакта в статических условиях описаны в работе [8]. Величина рассеиваемой энергии в контакте за один цикл нагружения определялась по площади петли, ограниченной кривыми смещения при нагружении контакта сдвигающей силой и последующей разгрузкой. На рис. 1 показаны графики предварительных смещений при сдвиге поперек следов обработки (линии 1, 3, 5) и вдоль (линии 2, 4, 6) для стального образца с твердостью HRC 40 ед. и шероховатостью пятого класса в контакте со стальным, твердостью HB 220 и полированным до двенадцатого класса чистоты (линии 1, 2), со свинцовым (линии 3, 4) и с медным (линии 5, 6) образцами. Восходящая линия — нагружение контакта сдвигающей силой. Нисходящая — упругий возврат, соответствующий разгрузке. При снятии сил сжатие исчезает и остается остаточное смещение. Из рис. 1 видно, что при одной и той же сдвигающей силе, не превышающей предельной, как величина предварительного смещения, так и величина рассеиваемой энергии вдоль следов обработки оказывается больше, чем поперек. Это определяется не только различием коэффициентов трения покоя по рассматриваемым направлениям, но и различием деформационной способности вытянутых вдоль следов обработки шероховатостей.

Для теоретического исследования рассеивания энергии в контакте шероховатая поверхность моделируется набором эллипсоидальных сегментов, расположенных по высоте, согласно кривой опорной поверхности. При нагружении контакта по схеме (рис. 1) величина рассеива-

ния энергии за один цикл будет определяться по формуле

$$\omega = \int_0^{P'} (\Delta' - \Delta) dP, \quad (1)$$

где Δ — смещение, соответствующее кривой OA (рис. 1), Δ' — упругий возврат (линия AB), P' — сдвигающая сила.

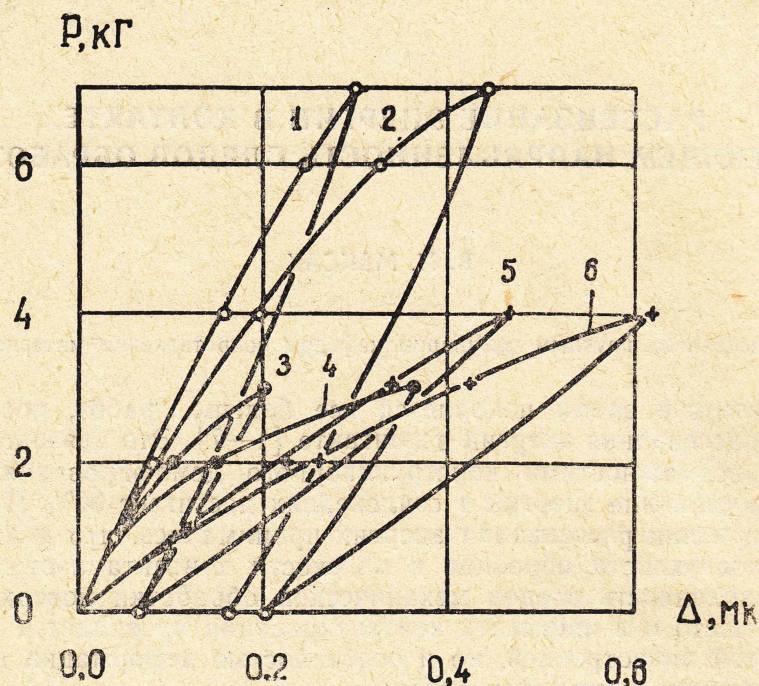


Рис. 1. Графики предварительных смещений при сдвиге поперек следов обработки (линии 1, 3, 5) и вдоль (линии 2, 4, 6) для стального образца в контакте: со стальным (линии 1, 2), со свинцовым (линии 3, 4), с медным (линии 5, 6) образцами

Формула для определения смещения Δ , полученная в работе [9], имеет вид

$$\Delta = \frac{2fh_{\max}\epsilon\kappa}{(1-\mu)n_an_6} \left[1 - \left(1 - \frac{P}{fN} \right)^{2/3} \right], \quad (2)$$

где f — коэффициент трения покоя,

h_{\max} — максимальная высота неровностей,

μ — коэффициент Пуассона,

n_a, n_6 — коэффициенты, зависящие от главных кривизн соприкасающихся выступов в месте контакта и угла между плоскостями главных кривизн [10],

N — сила сжатия,

κ — коэффициент, учитывающий влияние формы выступа на его деформацию и определяемый по диаграмме [11, 12],

ϵ — величина относительного сближения контактирующих тел

$$\epsilon = \left[\frac{\pi n_6^{3/2} (1-\mu) (r_{\text{пр}} + r_{\text{поп}})^{1/2} N}{1,88bK_2 h_{\max}^{1/2} GA_c} \right]^{2/(2\nu+1)}, \quad (3)$$

где $r_{\text{пр}}, r_{\text{поп}}$ — радиусы выступа в продольном и поперечном направлениях соответственно,

b, ν — параметры кривой опорной поверхности,

K_2 — коэффициент, зависящий от ν [13],

G — модуль сдвига,

A_c — контурная площадь.

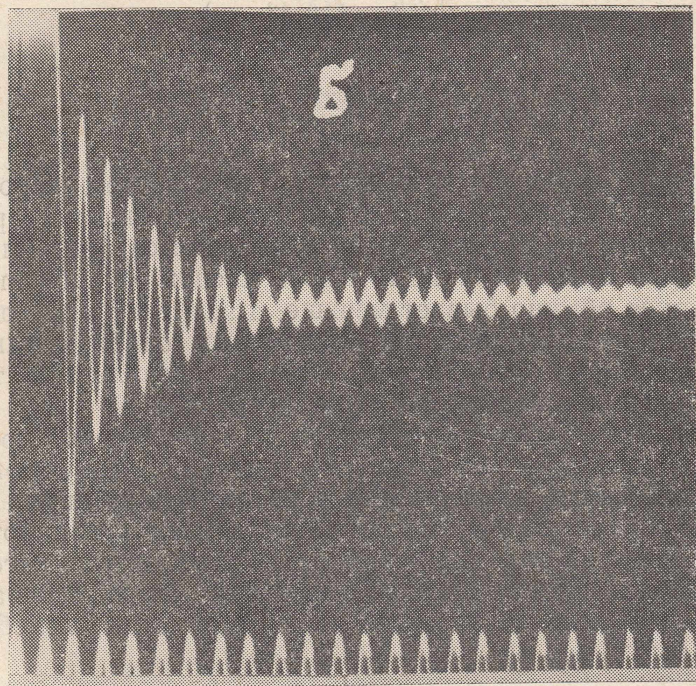
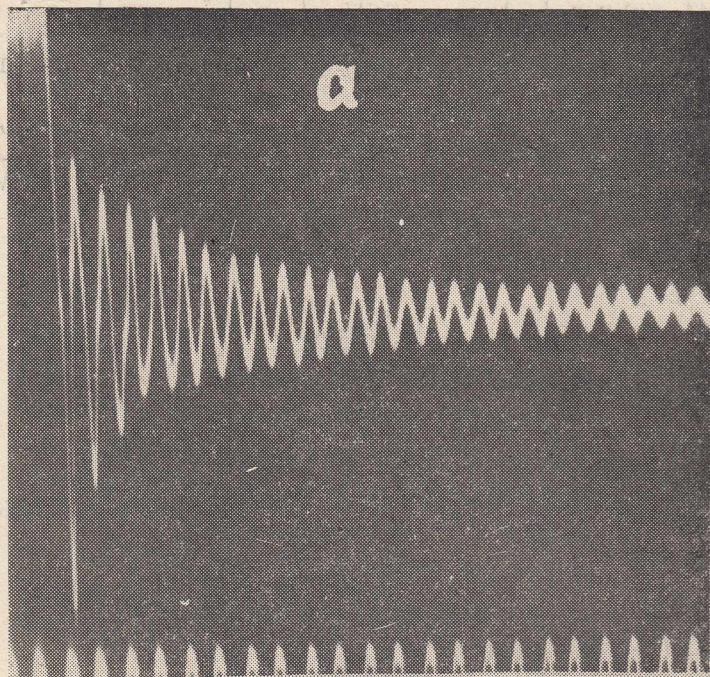


Рис. 2. Осциллограммы затухающих колебаний балки, консольно защемленной между двумя медными пластинами в прессе силой 50 кг: *a* — шероховатость пластин направлена перпендикулярно продольной оси балки, *б* — шероховатость направлена вдоль оси

Аналогичным образом можно получить величину смещения Δ' .

$$\Delta' = \frac{2fh_{\max}\varepsilon x}{(1-\nu)n_a n_6} \left[2 \left(1 - \frac{P' - P}{2fN} \right)^{2/3} - \left(1 - \frac{P'}{fN} \right)^{2/3} - 1 \right], \quad (4)$$

где P — текущее значение сдвигающего усилия. После подстановки (2) и (4) в (1) получается

$$\omega = \frac{4,8h_{\max}f^2N\varepsilon x}{(1-\nu)n_a n_6} \left\{ 1 - \left(1 - \frac{P'}{2fN} \right)^{5/3} - \frac{5P'}{12fN} \left[2 + \left(1 - \frac{P'}{fN} \right)^{2/3} \right] + \right. \\ \left. + \frac{1}{4} \left[1 - \left(1 - \frac{P'}{fN} \right)^{2/3} \right] \right\}. \quad (5)$$

При $P' = fN$,

$$\left. \begin{aligned} \omega &= \frac{0,48h_{\max}f^2N\varepsilon x}{(1-\nu)n_a n_6}, \\ \text{при } P' \ll fN, \\ \omega &= \frac{0,11h_{\max}\varepsilon x P^3}{(1-\nu)n_a n_6 fN^2}. \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

При симметричном циклическом нагружении формула (1) принимает вид

$$\omega = \int_{-P'}^{P'} (\Delta' - \Delta'') dP, \quad (7)$$

где $\Delta'' = -\Delta'(-P)$, тогда

$$\omega = \frac{9,6h_{\max}f^2N\varepsilon x}{(1-\nu)n_a n_6} \left\{ 1 - \left(1 - \frac{P'}{fN} \right)^{5/3} - \frac{5P'}{6fN} \left[1 + \left(1 - \frac{P'}{fN} \right)^{2/3} \right] \right\}. \quad (8)$$

При $P' = fN$,

$$\left. \begin{aligned} \omega &= \frac{1,6h_{\max}f^2N\varepsilon x}{(1-\nu)n_a n_6}, \\ \text{при } P' \ll fN, \\ \omega &= \frac{0,296h_{\max}\varepsilon x P^3}{(1-\nu)n_a n_6 fN^2}. \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

Анализ формул (6) и (9) показывает, что с ростом шероховатости рассеивание увеличивается. Различие рассеивания энергии при смещении вдоль и поперек следов обработки определяется величинами f и x по соответствующим направлениям. Вдоль следов обработки коэффициент трения покоя обычно бывает меньше, а значение x всегда больше, поэтому и рассеивание энергии при одинаковых силах сдвига $P' < fN$ вдоль следов обработки больше, чем поперек. Результаты теоретического анализа хорошо согласуются с экспериментом.

В динамических условиях теоретические зависимости проверялись по результатам обработки осциллограмм свободных затухающих колебаний консольной балки, защемленной в прессе между двумя пластинами, имеющими определенную направленность следов обработки.

На рис. 2 представлены две такие осциллограммы, по которым видно, что при направленности следов обработки вдоль оси балки, т. е. вдоль линии действия сдвигающих сил, затухание колебаний происходит быстрее.

В заключение необходимо отметить, что это свойство контакта может быть широко использовано на практике в качестве резерва повышения его демпфирующих свойств.

ЛИТЕРАТУРА

1. С. Б. Айнбиндер. О рассеивании энергии на фрикционном контакте при колебаниях. Изв. АН СССР, ОТН, 1962, № 4.

2. И. Р. Коняхин, Б. П. Митрофанов. О диссипации энергии в упругом дискретном контакте. Инженерный журнал МТТ, № 1, 1967.
 3. И. Л. Меерсон, Ю. Х. Газарян. Исследование демпфирующих свойств замковых соединений лопаток турбин елочного типа. Термопрочность материалов и конструктивных элементов, «Наукова Думка», Киев, вып. 4, 1967.
 4. В. В. Матвеев, А. П. Яковлев, А. Д. Балюк, Л. Н. Ржавин. Исследование демпфирующих свойств замкового соединения компрессорных лопаток при повышенной температуре. Термопрочность материалов и конструктивных элементов. «Наукова Думка», Киев, вып. 4, 1967.
 5. К. А. Прокофьев, М. М. Епанчиков. Демпфирующие свойства лопатки с индивидуальным хвостом ёлочного типа. Рассеивание энергии при колебаниях упругих систем. «Наукова Думка», Киев, 1966.
 6. В. И. Гогилашвили, М. В. Хвингия. Рассеивание энергии и жесткость соединения вал-втулка. Труды Грузинского политехнического института, № 7/112, Тбилиси, 1966.
 7. Р. Л. Зайдельман. Повышение надежности турбинных лопаток демпфированием колебаний. «Энергия», М., 1967.
 8. Б. П. Митрофанов, В. И. Максак. Анизотропия упругого предварительного смещения. Вестник АН Белорусск. ССР. Серия физико-технических наук, № 1, 1968.
 9. В. И. Максак. Количественная оценка упругого предварительного смещения при направленной шероховатости поверхности. Изв. ТПИ, т. 225, Томск, 1970.
 10. С. Д. Пономарев, В. Л. Бидерман, К. К. Лихарев, В. М. Макушин, Н. Н. Малинин, В. И. Феодосьев. Расчеты на прочность в машиностроении. Машгиз, М., т. 2, 1958.
 11. R. D. Mindlin. Compliance of Elastic Bodies in Contact. J. Appl. Mech. 16, 1949.
 12. А. И. Лурье. Пространственные задачи теории упругости. Гостехиздат, М., 1955.
 13. Н. Б. Демкин. Фактическая площадь касания твердых поверхностей. М., АН СССР, 1962.
-